

METHODE CALORIMETRIQUE DE MESURE DES ENTHALPIES DE FORMATION DES ALLIAGES LIQUIDES A FORTE TENSION DE VAPEUR

K. P. Kotchi, R. Castanet et J. C. Mathieu

CENTRE DE THERMODYNAMIQUE ET DE MICROCALORIMETRIE DU C. N. R. S.
26, RUE DU 141^e R. I. A., 13003 MARSEILLE, FRANCE

(Reçu le 24 Novembre, 1986)

The heat effects corresponding to the dissolution of solid PbSe in liquid Pb-Se alloys starting from pure Pb were measured with a direct reaction calorimeter. The partial enthalpy of formation of PbSe in the melt and the integral enthalpy of formation of the Pb-PbSe system in the liquid state referred the liquid Pb and PbSe were deduced. Then, from a very simple change of reference state, and in the knowledge of the enthalpy of PbSe, the integral enthalpy of formation of Pb-Se liquid alloys with reference to pure liquid components could be derived. The results agreed very well with those obtained previously on the dissolution of Se in Pb. The method used can be applied whenever the component to be added to the bath has a high vapor pressure.

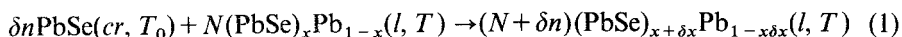
Après avoir déterminé, par calorimétrie de réaction directe, l'enthalpie de formation des alliages Pb-Se liquides et du sélénure de plomb, une étude systématique du pseudo-binaire Pb-PbSe a été entreprise. Cette étude a essentiellement pour but de vérifier l'exactitude des résultats qui avaient été obtenus [1, 2] par additions successives de sélénium à l'alliage liquide. Dans le domaine de température étudiée (951-1365 K), la pression de vapeur de sélénium liquide pur est en effet très élevée ($P_0 = 1$ atm à 958 K) et il était donc possible que des pertes de matière non négligeables se produisent par évaporation dans l'intervalle de temps où l'échantillon de sélénium s'échauffe, fond et réagit avec le plomb. Par contre, une fois le mélange effectué, les pertes deviennent négligeables du fait des fortes interactions plomb-sélénium qui abaissent considérablement l'activité des constituants. Il était donc nécessaire d'effectuer une vérification soigneuse des résultats obtenus puisque, en ce qui concerne l'enthalpie de formation du système plomb-sélénium liquide, nos données sont les seules disponibles. Ce faisant, nous avons mis au point une méthode qui peut être appliquée chaque fois que l'un des deux constituants possède une tension de vapeur élevée et qu'il existe dans le système un composé intermédiaire.

1. Détermination de l'enthalpie de dissolution

a) Principe de la mesure

Les mesures d'enthalpies partielles de PbSe dans le plomb liquide ont été effectuées à huit températures entre 951 et 1365 K à l'aide d'un microcalorimètre Tian-Calvet.

Dans un bain métallique de plomb liquide maintenu à la température T , ont été effectuées des chutes successives de sélénure de plomb à la température voisine de 298 K. L'étalonnage de la cellule de mesure a été réalisé par chutes de masses connues de plomb dans le plomb (Prolabo 99,999%) à la température T . Les chutes successives de plomb pour l'étalonnage comme celles de sélénure de plomb pour la dissolution ont été effectuées sous une pression d'argon U égale à 1 atmosphère. Les dissolutions de PbSe dans le plomb correspondent à la réaction :



x étant la fonction molaire de PbSe dans le mélange.

L'effet thermique produit rapporté à une mole de soluté est la somme de la variation d'enthalpie de PbSe de $T_0 = 300$ K à T , $\Delta_{T_0}^T h_{\text{PbSe}}$, et de l'enthalpie partielle de dissolution de PbSe dans le plomb, $\Delta_f h_{\text{PbSe}}(x', cr, T)$, référée à PbSe solide :

$$\Delta_{\text{diss}} h = \Delta_{T_0}^T h_{\text{PbSe}} + \Delta_f h_{\text{PbSe}}(x', cr, T) \text{ avec } x' = x \frac{\delta x}{2} \quad (2)$$

Les données thermodynamiques nécessaires au calcul des grandeurs ci-dessus ont été tirées de la compilation de Hultgren et al. [3] en ce qui concerne Pb et Se, de celle de Barin et Knacke [4] pour PbSe.

b) Résultats

Les résultats expérimentaux sont consignés dans le tableau 1 et représentés par les figures 1, 2 et 3. Dans le domaine monophasé liquide, l'enthalpie partielle de dissolution de PbSe dans Pb varie linéairement avec la composition (fig. 1 (1), tableau 2) et l'on peut écrire :

$$\Delta_f h_{\text{PbSe}}(x', cr, T) = \Delta_f h_{\text{PbSe}}^\infty(cr, T) + x' \eta_{\text{PbSe}}^{\text{PbSe}} \quad (3)$$

où $\Delta_f h_{\text{PbSe}}^\infty$ et $\eta_{\text{PbSe}}^{\text{PbSe}}$ sont respectivement les enthalpies à dilution infinie et le paramètre enthalpie de PbSe dans Pb.

Dans le domaine diphasé, les effets thermiques mesurés correspondent uniquement à la variation d'enthalpie du composé PbSe de T_0 à T . Comme dans l'étude du système Pb-Se la limite de phase x^L est donnée par la discontinuité de

Tableau 1 Enthalpie de dissolution de PbSe dans Pb par référence à PbSe solide et enthalpie molaire intégrale de formation des solutions Pb-PbSe par référence aux constituants purs liquides

$x \cdot 10^2$	$\Delta_f h_{\text{PbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$x \cdot 10^{-2}$	$\Delta_f h_{\text{PbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$T = 951 \text{ K}$					
0,17	64 622	28	2,58	5 908	- 253
0,46	57 183	52	3,04	17 886	- 393
0,72	62 613	91	3,39	4 560	- 548
0,96	64 387	135	3,82	10 171	- 713
1,19	66 325	176	4,29	-11 163	- 951
LIMITE DE PHASE			4,70	-21 732	-1 291
1,47	36 426	143	5,10	-26 966	-1 595
1,82	10 736	14	5,50	- 8 351	-1 824
2,07	29 012	- 35	6,02	- 1 682	-2 089
$T = 1040 \text{ K}$					
0,56	69 735	123	6,53	8 062	- 817
1,15	67 659	232	7,61	11 343	-1 233
1,67	57 597	282	8,55	5 368	-1 658
2,34	65 986	402	9,71	-16 388	-2 456
LIMITE DE PHASE			10,75	498	-2 979
2,92	29 229	285	11,92	1 874	-3 548
3,69	20 020	60	12,72	1 293	-3 942
4,66	20 192	-224	13,44	- 184	-4 311
5,57	28 422	-412	14,35	- 1 264	-4 758
$T = 1118 \text{ K}$					
0,50	60 212	58	11,32	60 948	1 490
0,97	63 195	130		Limite de Phase	
1,50	66 559	220	12,05	40 166	1 194
2,15	71 031	369	12,38	13 564	1 055
2,99	63 739	492	13,22	6 703	645
3,68	65 111	604	14,19	3 640	133
4,42	52 534	628	15,19	5 431	- 375
5,16	59 802	712	16,06	- 1 623	- 885
5,86	57 739	774	17,13	1 958	-1 469
6,57	63 856	884	17,92	- 1 560	-1 936
7,55	54 635	939	18,90	- 6 142	-2 564
8,49	67 216	1 118	19,80	- 3 582	-3 118
9,41	61 609	1 235	20,60	381	-3 566
10,26	62 580	1 358			

Tableau 1 (Suite 1)

$x \cdot 10^2$	$\Delta_f h_{\text{PbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$x \cdot 10^2$	$\Delta_f h_{\text{PbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$T = 1168 \text{ K}$					
0,75	66 588	132	18,86	26 660	296
1,83	61 417	265	19,78	7 171	- 246
3,02	61 969	420	21,07	1 318	- 1 072
4,11	64 973	604	22,40	- 2 698	- 1 851
5,59	58 208	734	23,98	1 385	- 2 782
6,87	64 856	955	25,12	1 288	- 3 402
8,54	59 969	1 142	26,63	4 774	- 4 352
10,11	56 998	1 259	28,21	- 1 728	- 5 279
11,13	62 710	1 401	29,10	1 686	- 5 789
13,29	62 545	1 399	29,95	2 230	- 6 271
14,46	42 647	1 277	30,81	2 628	- 6 758
15,90	61 677	1 469	31,70	3 072	- 7 268
	Limite de Phase		32,51	1 040	- 7 693
17,42	26 660	1 040			
$T = 1235 \text{ K}$					
2,29	67 320	416	40,82	46 538	4 582
4,76	72 149	995	43,99	44 296	4 077
8,13	66 454	1 571	45,66	57 049	4 185
9,82	67 053	1 875	47,31	51 028	4 113
18,10	62 496	3 105		LIMITE DE PHASE	
20,82	59 814	3 356	49,94	6 213	1 768
22,77	66 354	3 700	51,98	- 2 058	- 388
25,27	62 103	4 000	53,90	11 468	- 1 878
27,17	63 906	4 277	55,40	7 677	- 3 162
29,17	62 705	4 534	56,86	7 025	- 4 435
32,39	54 291	4 564	58,69	12 794	- 5 785
33,01	61 931	4 886	60,03	17 313	- 6 627
38,11	54 333	4 904	61,20	14 008	- 7 460
$T = 1261 \text{ K}$					
1,23	55 911	86	40,88	52 517	1 152
2,64	50 333	100	42,96	50 647	1 168
4,00	60 128	247	44,72	49 794	1 152
5,71	62 961	494	46,84	49 325	1 114
7,48	63 392	750	49,01	52 082	1 185
8,97	65 710	1 005	50,45	43 982	1 009
12,24	44 551	397	52,04	52 095	1 064
14,04	43 404	266	53,82	48 435	1 005

Tableau 1 (Suite 2)

$x \cdot 10^2$	$\Delta_f h_{\text{pbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$x \cdot 10^2$	$\Delta_f h_{\text{pbSe}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
15,85	59 505	481	55,21	39 580	681
17,88	47 534	433	56,73	40 024	353
20,26	57 333	652	58,21	46 785	257
22,76	56 576	867	59,76	42 438	— 3
24,82	53 480	959	60,92	41 455	— 52
29,52	54 467	1 230	62,18	49 748	— 46
32,09	47 869	1 138	63,41	44 785	— 79
34,14	51 136	1 168		LIMITE DE PHASE	
36,41	46 907	1 048	64,56	5 518	— 405
38,79	50 965	1 075	65,66	10 669	— 2 840
$T = 1360 \text{ K}$					
1,30	6 298	82	24,70	6 006	1 313
2,45	9 396	190	25,80	5 313	1 372
3,82	13 824	382	27,02	— 1 475	— 1 325
5,43	10 918	558	28,38	— 5 533	1 197
7,18	6 060	660	29,64	— 3 651	1 112
8,83	8 707	803	30,82	2 875	1 141
10,30	10 283	955	32,32	7 686	1 283
11,80	7 818	1 070	33,75	486	1 226
13,27	10 355	1 225	35,08	— 2 792	1 184
15,10	— 1 379	1 171	36,58	— 496	1 146
17,73	— 353	1 124	38,07	329	1 126
19,72	— 1 783	1 053	39,55	— 2 285	1 045
21,07	5 102	1 122	40,74	— 3 686	952
23,48	— 4 060	1 236	43,06	— 2 899	598
$T = 1365 \text{ K}$					
3,36	3 853	129	47,03	7 972	— 1 157
6,33	10 819	458	50,37	— 15 690	— 2 074
9,77	16 384	1 044	53,38	— 9 087	— 2 499
13,37	8 018	1 322	55,94	— 14 346	— 3 150
16,63	— 3 434	1 143	58,36	— 11 003	— 3 580
20,84	— 2 117	978	60,41	— 21 071	— 4 441
25,15	— 1 896	1 028	62,21	— 11 101	— 4 743
30,14	— 1 882	883	64,13	— 17 394	— 5 387
35,08	— 3 414	533	65,64	— 13 097	— 5 711
39,46	— 6 018	86	67,11	— 14 836	— 6 103
43,50	— 11 747	— 703			

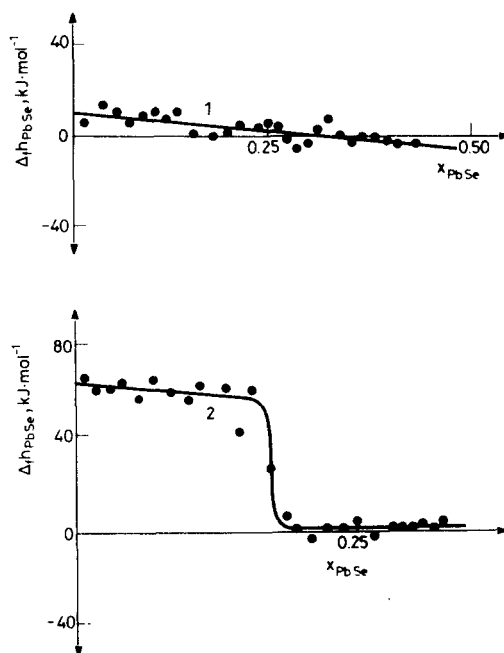


Fig. 1 Enthalpies partielles de dissolution de PbSe dans Pb, $\Delta_f h_{\text{PbSe}}$, par référence à PbSe: liquide à $T = 1360 \text{ K}$ (courbe 1) et solide à $T = 1168 \text{ K}$ (courbe 2)

l'enthalpie partielle et par le changement de pente de l'enthalpie molaire intégrale de formation des alliages lors du franchissement des limites de phases (fig. 1 (1), fig. 2 et tableau 2).

L'enthalpie intégrale de formation de l'alliage liquide $\Delta_f h(x, l, T)$ référée aux constituants PbSe et Pb liquides se déduit de la même grandeur référée à PbSe solide et Pb liquide, $\Delta_f h(x, l, T)$, par la relation :

$$\begin{aligned} \Delta_f h(x, l, T) &= \Delta_f h(x, l, T) - x \{ \Delta_{\text{fus}} h_{\text{PbSe}}(T_f) \\ &+ \int_{T_f}^T |C_p(\text{PbSe}, l, T) - C_p(\text{PbSe}, cr, T)| dT \} \end{aligned} \quad (4)$$

où $\Delta_{\text{fus}} h_{\text{PbSe}}(T_f)$ est l'enthalpie de fusion de PbSe à la température de fusion T_f . Les valeurs de $\Delta_f h(x, l, T)$ sont rassemblées dans le tableau 1 et visualisées par les figures 2.

Tableau 2 Enthalpie partielle limite de dissolution de PbSe dans le plomb, $\Delta_f h_{\text{PbSe}}^\infty$ (o, cr, l); paramètre enthalpique $\eta_{\text{PbSe}}^{\text{PbSe}}$ écart-type de l'équation (2); limite de la validité de la regression x^* ; fraction molaire $x_{\text{Se}}^{\text{L}} = x/(1+x)$ correspondant au liquidus riche en Plomb dans le diagramme de phase Pb-Se

	951	1040	1118	1168	1235	1262	1360	1365
T, K								
$\Delta_f h^\infty$ (o, cr, l), $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	60 300	70 015	63 572	64 450	70 446	63 705	59 400	59 860
$\eta_{\text{PbSe}}^{\text{PbSe}}, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	-389 534	-333 728	-28 284	-41 099	-34 648	-80 379	-31 782	-41 413
$\sigma, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	3 146	5 322	4 770	3 335	5 046	7 950	5 510	9 590
x^*	0,012	0,023	0,114	0,111	0,382	0,19	0,431	0,671
$x_{\text{Se}}^{\text{L}} = x/(1+x)$	0,0131	0,0256	0,1046	0,1428	0,3272	0,3902		

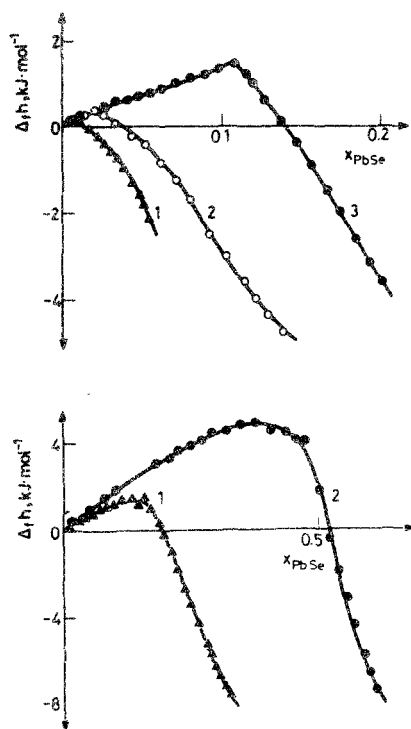
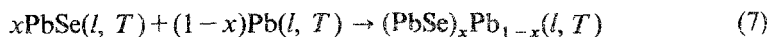
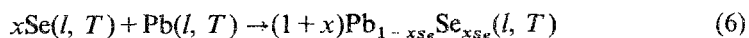
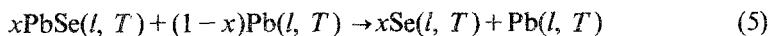


Fig. 2 Enthalpie molaire intégrale de formation des mélanges Pb-PbSe par référence aux constituants purs liquides à T (K). (a) $T = 951$ K (courbe 1), 1040 K (courbe 2) et 1118 K (courbe 3), (b) $T = 1168$ K (courbe 1) et 1235 K (courbe 2)

2. Comparaison des résultats avec ceux obtenus par dissolution de sélénium dans le plomb

Un simple changement d'état de référence permet de passer des résultats issus du pseudo-binaire Pb-PbSe à ceux obtenus sur le binaire Pb-Se. On peut écrire :



où x_{Se} est la fraction molaire du sélénium dans le bain, d'où

$$\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T) = \frac{1}{1+x} \Delta_f h(x, l, T) + \frac{x}{1+x} \Delta_f h(\text{PbSe}, l, T) \quad (8)$$

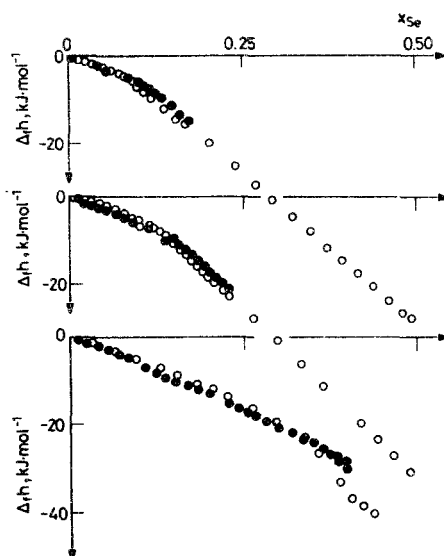


Fig. 3 Enthalpie molaire intégrale de formation des alliages Pb-Se liquides par référence aux constituants purs liquides des à $T = 1168$ K (a), 1235 K (b) et 1262 K (c). (○) étude du système Pb-Se : (●) étude du pseudo-binaire Pb-PbSe

$\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T)$ et $\Delta_f h(\text{PbSe}, l, T)$ sont respectivement les enthalpies de formation des alliages Pb-Se et du composé PbSe liquides par référence aux constituants Pb et Se purs liquides. La relation (8) et le tableau 1 permettent le calcul de $\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T)$ en fonction de la fraction molaire en sélénium, $x_{\text{Se}} = x/(1+x)$ dans le mélange.

Le lissage des valeurs de $\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T)$ obtenues à l'aide d'un polynôme du type $\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T) = x_{\text{Se}}(1-x_{\text{Se}}) \sum C_i x_{\text{Se}}^i$ et l'utilisation de la relation de Gibbs-Duhem, conduisent aux propriétés partielles du sélénium et du plomb dans le mélange liquide. A titre d'exemple, nous donnons dans le tableau 3 les résultats obtenus à 1262 K. La comparaison des deux séries de résultats obtenus dans le domaine monophasé liquide, se fait au moyen des courbes de la figure 3 et des valeurs du tableau 4. Pour l'ensemble des compositions étudiées à diverses températures, l'accord entre les résultats issus des deux séries d'investigations est satisfaisant, exception faite des mesures réalisées à 1235 K pour lesquelles subsiste un écart au niveau de la détermination du point du liquidus x_{Se}^L . La valeur $x_{\text{Se}}^L = 0,248$ obtenue par dissolution de Se dans Pb liquide (contre $x_{\text{Se}}^L = 0,327$, issue de la dissolution de PbSe dans le même solvant) semble être la meilleure car elle concorde non seulement avec l'ensemble de nos résultats mais également avec ceux de la littérature [5, 7].

Le travail précédent nous a donc permis de confirmer l'exactitude des valeurs des

Tableau 3

$x_{\text{Se}} \cdot 10^2$	$-\Delta_f h_{\text{Se}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$-\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$x_{\text{Se}} \cdot 10^2$	$-\Delta_f h_{\text{Se}},$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	$-\Delta_f h,$ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$T = 1262 \text{ K}$					
0	53 839	0	29,02	71 549	19 417
1,22	62 052	762	30,05	71 784	20 138
2,57	55 065	1 696	31,90	71 915	21 485
3,85	55 992	2 445	32,89	72 204	22 140
5,40	61 276	3 299	33,53	72 657	22 712
6,96	67 165	4 155	34,23	73 542	23 168
8,23	70 785	4 818	35,00	75 178	23 745
10,91	73 274	7 251	35,57	76 980	24 366
12,31	72 184	8 352	36,20	79 716	25 015
13,68	70 204	9 125	36,79	83 134	25 494
15,17	67 704	10 210	37,41	87 794	26 086
16,85	65 239	11 205	37,86	91 973	26 431
18,54	63 761	12 222	38,34	97 270	26 762
19,82	63 495	13 098			
22,79	65 436	14 943		Limite de Phase	
24,29	67 231	16 079	38,80	150 523	27 107
25,45	68 659	16 877	39,23	161 609	27 603
26,69	70 007	17 844	39,64	176 042	29 353
27,95	71 024	18 715			

enthalpies mesurées par calorimétrie de réaction directe entre le plomb et le sélénium. L'accord entre les deux méthodes montre en effet que les pertes en sélénium, par évaporation, lors des expériences de calorimétrie de réaction directe, étaient négligeables. Le méthode mise au point ici peut cependant être extrêmement utile en permettant les mesures mettant en jeu un élément fortement volatil (As, P, I, Se, Te, . . .). Elle ne permet évidemment que d'explorer le domaine de concentration compris entre le composé intermédiaire utilisé comme soluté et le constituant pour le moins volatil. Il y a lieu de noter cependant que rien ne s'oppose en principe à ce que l'on remplace le composé intermédiaire par un alliage solide plus riche en élément le plus volatil.

Tableau 4 Enthalpie molaire intégrale de formation, $\Delta_f h(x_{\text{Se}}, l, T)$, des alliages liquides Pb-Se par référence à Pb et Se purs liquides

$x_{\text{Se}}, T, \text{K}$	$-\Delta_f h, \text{Kj mol}^{-1}$							
	951	1040	1118	1168	1235	1262	1360	1365
		268	205	164	109	96		134
0,004	229*	194*	241*	230*	187*	307*	260*	366*
		632	523	406	368	406		385
0,010	550*	488*	559*	545*	484*	717*	639*	849*
			2707	2385	2 301	2 778		2 790
			2790*	2805*	2 530*	2 997*	3 002*	3 113*
0,10				5464	5 284	5 648		5 711
			5639*	5752*	5 062*	6 427*	6 080*	5 984*
0,15					8 623	9 146		8 786
					7 892*	10 038*	9 472*	9 490*
0,20					12 414	12 117		12 012
					10 770*	13 266*	12 995*	13 158*
0,25						15 648		15 535
					13 821*	16 525*	16 533*	16 978*
0,30						19 497		19 338
					17 861*	20 122*	20 490*	21 288*
0,35						24 590		23 614
						23 866*		26 191*
0,40								28 480
								31 549*

* Valeurs obtenues à partir de l'étude du pseudo-binaire Pb-PbSe.

Références

- 1 K. P. Kotchi, C. Chatillon-Colinet et J. C. Mathieu, *J. Chim. Phys.*, 77 (1980) N° 9 791-795.
- 2 K. P. Kotchi, R. Castanet et J. C. Mathieu, *Thermochem. Acta*, 76 (1984) 311.
- 3 R. Hultgren, P. D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser et K. K. Kelley, *Properties of Elements*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073.
- 4 I. Barin et O. Knacke, *Thermochemical Properties of Inorganic Substances*, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, Verlag Stahleisen m. b. h. Düsseldorf, Supplement 1977.
- 5 M. Schneider et J. C. Guillaume, *J. Chem. Solids*, 35 (1974) 471-478.
- 6 R. F. Brebrick et E. Gubner, *J. Chem. Phys.*, 36 (1962) 1970.
- 7 D. N. Seidman, *Trans. Metall. Soc. AIME.*, 236 (1966) 1361.

Zusammenfassung — Die bei der Überführung von festem PbSe in flüssige Pb-Se-Legierungen auftretenden Wärmeeffekte wurden mittels direkter Reaktionskalorimetrie bestimmt. Die auf flüssiges Pb und PbSe bezogene partielle Bildungsenthalpie des Pb-PbSe-Systems im flüssigen Zustand wurde ermittelt. Durch eine geringfügige Veränderung des Referenzzustandes konnte bei Kenntnis der Enthalpie von PbSe die integrale Bildungsenthalpie von flüssigen Pb-Se-Legierungen in Bezug auf die reinen Komponenten abgeleitet werden. Die Ergebnisse stimmen gut mit denen überein, die früher für die Auflösung von Se in Pb erhalten wurden. Die Methode ist anwendbar, wenn dem Bade zuzugebende Komponenten einen hohen Dampfdruck haben.

Резюме — Прямым реакционным калориметром были измерены тепловые эффекты растворения твердого PbSe в жидких сплавах Pb-Se, начиная с чистого свинца. Были установлены дифференциальная энтальпия образования PbSe в расплаве и интегральная энтальпия образования системы Pb-PbSe в жидком состоянии относительно Pb и PbSe. Исходя из очень простого изменения исходного состояния и зная энтальпию PbSe, может быть выведена интегральная энтальпия образования жидких сплавов Pb-Se относительно исходных жидких компонентов. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее при растворении селена в свинце. Метод может быть использован к любой компоненте, прибавленной в сосуд с высоким давлением паров.